

三维重建技术在踝关节外侧韧带损伤诊断及术前规划中的研究进展

王 硕¹ 李志强² (通讯作者)

1.承德医学院 河北 承德 067000

2.沧州市人民医院 河北 沧州 061000

【摘 要】：踝关节外侧韧带损伤属于临床中比较常见的运动损伤，如果患者没有及时进行治疗，病情会发展成为慢性踝关节不稳，进而引起关节疼痛和功能障碍。传统二维影像经常出现结构重叠的情况，不能完全呈现韧带的立体损伤形态，限制了术前个体化方案的制定。三维重建利用薄层影像建立数字化模型，对韧带损伤进行可视化和量化评估，以辅助进行术前测量、术式选择和手术模拟。本文分析该技术在踝关节外侧韧带损伤诊疗上的应用价值，归纳现有不足并推测发展方向，为临床个体化诊疗给予参考。

【关键词】：三维重建；踝关节外侧韧带损伤；术前规划；踝关节不稳；影像学诊断

DOI:10.12417/2705-098X.26.19.098

引言

踝关节外侧韧带损伤属于临床上比较常见的运动损伤，如果诊疗工作不规范就容易演变成慢性踝关节不稳，引起持续性的疼痛和反复的扭伤，甚至还会出现创伤性关节炎，对关节功能造成损害。X线、CT、MRI等传统二维影像使用断层图像来评估病变，但受到解剖结构重叠的干扰，很难直观地呈现出韧带复合体的立体走行和损伤范围，这会限制对隐匿损伤的检出、术前评估^[1]。三维重建通过利用薄层影像来形成数字化立体模型，弥补了平面成像存在的不足，并且逐渐被应用到韧带损伤诊断和术前规划上。本文对这项技术在临床上的应用情况、存在的不足之处和发展趋势进行总结，给踝关节外侧韧带损伤的个体化诊疗提供参考。

1 踝关节外侧韧带解剖及三维重建关键技术

踝关节外侧韧带复合体包括距腓前韧带、距腓后韧带和跟腓韧带这三组独立的韧带结构，该结构维持踝关节外侧的稳定性，并且限制距骨出现异常移位，属于重要的软组织屏障。距腓前韧带比较薄弱，临床损伤发生率较高，主要限制踝关节内翻和前移活动。距腓后韧带具有坚韧的结构和较强的抗张能力，很少出现单纯性的损伤，跟腓韧带跨越距跟关节，共同维持后足的力学平衡^[2]。三组韧带共同配合形成立体的稳定结构，常规二维影像很难完整呈现韧带在空间中的走行、与骨性结构的毗邻关系、细微损伤形态，给临床精准诊疗造成局限。

临床中用于踝关节韧带损伤诊疗的三维重建技术主要包括MRI三维重建、CT软组织重建和多模态影像融合重建这三种主要技术。MRI三维重建利用良好的软组织分辨率，可以准确识别韧带纤维走向、水肿撕裂和连续性中断等病理改变，属于韧带软组织成像的重要技术。CT三维重建主要对骨性结构进行立体成像，可以清楚地展示骨折和骨赘等骨性继发损伤，以此来弥补软组织成像存在的不足。多模态融合重建把两种影像的优势结合在一起，解决了单一成像方法存在的局限，达到

让骨性结构和软组织结构一起进行立体显示的效果，给损伤评估和术前规划提供了整体的解剖数据支持。

2 三维重建技术在踝关节外侧韧带损伤诊断中的应用研究

2.1 基于三维重建的韧带损伤解剖结构精准可视化

三维重建技术可以把踝关节外侧韧带损伤的解剖结构进行精确的可视化展示，从而突破了传统二维影像在成像上存在的平面视角限制。常规X线检查、单层MRI和CT影像只能展示单一断面的组织结构，很难清楚地显示出韧带的整体走行、纤维缺损范围、其和周边肌腱、骨性结构的空间毗邻关系。该技术通过对薄层影像数据进行立体建模，完整地恢复了韧带复合体的三维立体形态，并且直观地展示了韧带撕裂、松弛和移位等细微损伤特点。它可以分辨完全撕裂和部分撕裂在解剖上的区别，给医生直观地判断隐匿性韧带损伤提供准确的影像学依据。

2.2 三维重建技术对韧带损伤分级、分型的精准诊断价值

三维重建技术可以提高踝关节外侧韧带损伤分级和分型诊断的准确程度，该技术具有主要的临床价值。现在临床使用的大部分韧带损伤分型标准都依靠二维影像进行主观判断，该做法会由于角度误差和结构遮挡造成分型错误^[3]。三维立体建模可以把韧带损伤在位置、范围和形态上的改变完整地展示出来，并且准确地匹配临床损伤分型标准，还可以把距腓前韧带和跟腓韧带等不同结构的单发与联合损伤区分开来，通过这种方式纠正传统影像所造成的分型偏差，使损伤分型诊断流程得到规范，为临床区分保守治疗和手术治疗的适用指征提供了可靠的分型诊断支持。

2.3 三维重建结合量化参数对损伤严重程度的评估研究

三维重建和量化参数相结合，可以对踝关节外侧韧带损伤的严重程度进行客观评估，并且可以避免传统影像定性诊断存在的主观性问题。该技术能够使用影像后处理软件来准确得到

韧带纤维缺损面积、韧带松弛度、解剖移位距离等量化数据,并且以此形成客观的损伤评估模式。和过去依靠医师经验进行的主观判断相比,量化参数可以准确地反映出韧带损伤在病理上的损伤程度,并且区分轻度拉伤、部分撕裂和完全断裂这些不同的损伤梯度,该方式弥补了定性诊断在精度上存在的不足,给病情评估和疗效判定提供了比较标准的数据参考。

2.4 三维重建相较于传统影像诊断的临床效能对比分析

三维重建技术在踝关节韧带损伤诊断中具备优于传统影像检查的临床应用效能。传统二维影像仅能获取断面解剖信息,对隐匿性、复合性外侧韧带损伤的漏诊率较高,诊断结果易受医师阅片经验影响^[4]。三维重建技术整合薄层影像数据完成立体重构,全方位展示损伤病理特征,显著降低隐匿性损伤漏诊、误诊概率,提升诊断敏感性与特异性。同时该技术可统一诊断评估标准,减少人为阅片误差,提升不同医师诊断结果的一致性,整体诊疗应用效能显著优于传统影像学诊断模式。

3 三维重建技术在踝关节外侧韧带损伤术前规划中的应用研究

3.1 基于三维重建的术前解剖参数精准测量

三维重建模型可以对踝关节外侧区域多维解剖指标进行无创测算,这解决了传统影像利用二维断面间接估测数据的问题。临床工作能够利用重建模型直接对韧带止点坐标、骨隧道定位区域、距骨倾斜角度、腓骨远端骨量厚度等重要参数进行标记,并且不必要在手术过程中进行探查来获取解剖信息。该测量方法不受体位和断面截取角度的影响,获得的数据更接近真实的解剖形态,可以识别腓骨发育畸形、止点撕脱骨块等伴随病理改变的情况,为手术方案的设计提供客观量化的解剖基础,并且减少了术中解剖评估所花费的时间。

3.2 三维重建辅助踝关节外侧韧带修复、重建术式选择

踝关节外侧韧带损伤在个体解剖上存在差异,损伤模式也表现出不同,单一的手术方法无法适用于所有病例,三维重建模型可以为手术方式的选择提供解剖学依据。针对韧带止点完好且纤维只部分撕裂的患者,重建图像可以确认残端组织质量,医生应优先推荐直接修复方案。如果韧带本体纤维出现严重缺损且止点吸收,可以依靠模型来判断肌腱移植需要的长度和固定的位点,以此制定韧带重建方案^[5]。利用立体模型来预测损伤复合体的受累范围,可以减少术式判断的错误,并且让手术方案更好地符合患者的个体化损伤特点。

3.3 三维重建结合 3D 打印技术的术前模拟与导板制作

依托三维重建输出的数字化解剖模型,可通过 3D 打印制备实体踝关节仿真模型与个性化定位导板,实现术前实操推演。外科医师可在实体模型上预演骨隧道钻孔、移植物固定等关键操作,预判器械操作时可能遭遇的骨性阻挡与视野受限问题。基于模型设计的钻孔导板能够限定进针角度与深度,将数

字化规划的定位信息转移至术中真实骨骼表面,降低徒手定位造成的位点偏移,减少反复试钻对腓骨及距骨正常骨组织的非必要损伤。

3.4 三维重建术前规划对术中操作及术后疗效的改善作用

采用三维重建完成术前规划可优化手术流程,从操作层面降低踝关节韧带重建手术的各类潜在风险。术前充分掌握立体解剖与损伤细节,能够缩短术中探查时长,减少软组织剥离范围,降低血管神经误伤概率。精准的位点规划可保障移植张力处于合理区间,避免张力过高引发踝关节活动受限,或是张力不足造成外侧稳定性重建失败。现有临床随访资料提示,该模式下患者术后踝关节活动功能恢复更快,慢性疼痛、踝关节反复不稳等远期并发症的发生概率可得到有效控制。

4 三维重建技术诊疗应用的临床效果与优势分析

4.1 提升损伤诊断准确率与漏诊、误诊改善效果

传统二维影像学检查依靠断层图像开展判读,踝关节区域骨性结构重叠明显,纤细韧带组织的损伤征象极易被掩盖,对于合并止点微小撕脱骨块、多韧带联合损伤的病例,常常出现漏诊与误判。三维重建依托薄层影像数据集完成立体建模,能够脱离固定断层视角,完整展示外侧韧带复合体的空间走行、纤维缺损范围及其与周边骨性结构的毗邻关系。以关节镜探查结果作为诊断金标准,多项回顾性队列研究证实三维重建可以提高隐匿性韧带损伤的检出效能,弱化阅片者主观经验带来的诊断偏倚,修正二维影像对损伤范围低估的问题,为临床区分保守干预与外科手术指征提供更加可靠的影像学证据。

4.2 优化术前方案、降低手术难度与手术风险

踝关节外侧解剖间隙狭小,腓浅神经、腓骨肌腱紧邻韧带止点区域,个体间腓骨形态、韧带止点位置存在明显变异,仅依靠二维影像难以预判解剖异常带来的手术障碍。三维重建数字化模型可清晰呈现骨赘、畸形、撕脱骨片与受损韧带的空间位置关联,术者能够提前识别特殊解剖变异,对手术入路、骨隧道定位点与固定方式进行预先调整。个体化术前规划能够规避术中临时决策带来的不确定性,减少术中大范围软组织盲目剥离,降低骨隧道定位偏移、移植物固定失效等不良事件发生概率,为复杂慢性踝关节不稳病例构建匹配患者解剖特征的手术方案。

4.3 改善患者术后踝关节功能恢复预后

踝关节外侧韧带重建手术的核心目标在于重建距腓关节力学稳态,移植物安放位置与张力调控,直接决定患者远期关节功能恢复水平。基于三维重建模型开展术前规划,能够精准还原距骨与腓骨的相对空间位置,测算移植物适配长度与固定角度,有效规避张力失衡引发的关节活动受限或是持续性踝关节不稳。长期随访资料显示,采用三维重建辅助诊疗的病例,术后踝关节功能评分提升幅度优于传统规划组,关节活动度恢

复更为理想,慢性踝关节疼痛、反复内翻扭伤等影响日常活动的远期症状得到明显缓解,减少踝关节创伤性关节炎等继发性病变发生的潜在风险。

4.4 缩短手术时长、减少术中并发症的临床价值

常规踝关节外侧韧带重建术中,术者需要借助C臂透视反复校准骨隧道位置,多次探查解剖结构,繁琐操作延长切口暴露时间。三维重建预先完成全部解剖参数测算,可结合个性化定位导板,省去术中反复透视探查步骤,简化钻孔、移植物固定等核心操作流程。手术操作时间压缩能够减少切口长时间暴露引发的感染风险,降低软组织持续牵拉造成的局部肿胀与损伤。多项临床对照试验表明,该辅助模式可明显缩短平均手术耗时,同时降低神经刺激、骨皮质意外穿孔等术中即刻并发症发生率,整体提升踝关节韧带修复重建手术的操作安全性。

5 三维重建技术临床应用局限与发展展望

5.1 软组织成像精度与图像识别存在技术短板

当前三维重建对踝关节外侧韧带的成像质量仍存在固有缺陷,骨性结构重建效果稳定,但韧带这类薄细软组织信号易受周围脂肪、肌腱干扰,纤维边缘分割时常出现伪影。对于轻度韧带拉伤、微小部分撕裂等病变,重建模型难以精细区分纤维微观损伤改变,部分纤细韧带结构会出现图像间断假象,易造成假阳性判读。图像分割多依赖人工手动勾画,对韧带边界的辨识高度依赖影像医师的解剖认知水平,自动化识别算法对细微软组织病变的分辨能力尚不能完全满足精细化临床诊断需求。

5.2 重建流程繁琐,临床推广存在现实制约

踝关节多模态三维重建需采集薄层影像序列,再开展图像分割、配准、建模等系列后处理步骤,整套操作耗费大量人力与时间资源。影像后处理工作站价格昂贵,配套专业软件的运维成本较高,基层医疗机构难以配备完整硬件平台。同时,完成高质量重建工作要求操作人员掌握解剖知识与后处理操作技能,专业人才储备不足进一步限制普及。急诊场景下难以快

速生成重建模型,该特点使三维重建暂无法大规模应用于急性踝关节损伤的快速筛查工作。

5.3 缺乏统一量化评估标准,临床规范尚未建立

现阶段踝关节外侧韧带三维重建的参数选取、测量方法及损伤分级判定,尚未形成全国公认的标准化诊疗指南。不同医院使用的后处理软件算法存在差异,同一病例在不同设备测算得到的韧带长度、缺损面积等指标会出现数值偏差。各类研究采用的评价指标各不相同,研究数据之间难以横向对比,无法完成大样本荟萃分析。无统一操作规范也会造成不同医师对重建模型解读存在分歧,阻碍该技术纳入常规诊疗体系,影响临床证据等级提升。

5.4 智能化多模态融合重建的发展方向与临床前景

多模态影像融合可整合MRI软组织分辨优势与CT骨性成像特点,借助人工智能算法实现图像自动分割,大幅削减人工勾画的工作量。深度学习模型能够自主识别韧带撕裂、止点骨损伤等病变特征,缩短建模周期,提升测量指标的稳定性。随着算法迭代与硬件成本降低,轻量化重建平台有望下沉至基层医疗机构,联合术中导航系统实现实时可视化。后续可依托大样本数据构建统一评估体系,推动三维重建从辅助检查手段转变为踝关节外侧韧带损伤个体化诊疗的常规技术工具。

6 结语

三维重建技术突破传统二维影像的平面观测限制,在踝关节外侧韧带损伤的定性诊断、损伤量化评估与个体化术前规划方面展现独特优势,能够提升病变检出率,辅助优化手术方案,降低术中风险并改善患者术后踝关节功能。但该技术仍面临软组织成像质量有限、重建流程耗时、行业量化标准尚未统一等现实难题,限制其在基层医疗机构普及。伴随多模态影像融合与人工智能分割算法持续迭代,三维重建将进一步简化操作流程,构建规范化评估体系。未来随着相关临床证据不断积累,该技术有望成为踝关节外侧韧带不稳诊疗体系中重要的辅助工具。

参考文献:

- [1] 丁旭东,孙博,陈伟,等.3D 质子密度加权脂肪抑制序列对踝关节韧带和肌腱损伤的诊断价值[J].医学影像学杂志,2025,35(4):117-120.
- [2] 史旭,左华,王毓幸,等.踝外侧副韧带损伤对踝关节稳定性及软骨接触应变影响的有限元分析[J].中国组织工程研究,2023,27(31):4926-4931.
- [3] 路康,唐翔宇,罗凯,等.3D 打印导板辅助定位在外踝韧带重建术治疗慢性踝关节不稳中的应用研究[J].中华创伤骨科杂志,2024,26(4):293-299.
- [4] 杨海洲,杨秋翔,陈雨灵,等.踝关节外侧副韧带的解剖研究及对重建手术的意义[J].解剖学研究,2021,43(3):264-267.
- [5] 蔡琦,黄飞,梁晓稳.MRI 3D CUBE T2 序列检查在踝关节外侧韧带损伤诊断中的应用价值[J].现代医用影像学,2024,33(12):2258-2260.